

令和元年6月10日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19952

研究課題名(和文)LED照明と汎用カメラによる選択的なフリッカレス高速可視光通信技術

研究課題名(英文) Selective, Flickerless, and High-speed Visible Light Communication using LED illumination and General-purpose Camera

研究代表者

杉本 雅則 (Sugimoto, Masanori)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90280560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：1. 8x8 LED arrayを送信機、カメラを受信機として用い、空間分割多重化による可視光通信を実現した。逆畳み込みによる各光源の信号の干渉除去により、60fpsのグローバルシャッターカメラで5.76 kbpsの通信性能を実現した。

2. OFDM変調光とローリングシャッターカメラを用いた単一光源による高速可視光通信を提案、実装した。60 fps, ラインセンサ数524本のカメラを用い、24 kbps以下でエラー10%以下の通信性能を実現した。

3. OFDM変調光に対し、シャッター開度を変えることで受光可能なキャリアが変わること、それによりTVやラジオのような選択的通信が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的成果として、汎用カメラを用いた高速可視光通信の理論的な解析が挙げられる。社会的意義としては、誰もが日常的に携帯し使用するスマートフォン向けの応用が考えられる。搭載カメラと既存設備である照明との高速通信により、エリア限定の情報提供(例えば広告配信や実世界に情報を重畳する拡張現実システム)などの応用が可能となる。さらに、スマートフォンカメラをテレビやカメラのような選択的通信に利用することにより、個人向け情報提供や秘匿通信等へと展開できる。

研究成果の概要(英文)：1. A spatial division multiplexing visible light communication (VLC) system was developed using an 8x8 LED array and camera as a transmitter and receiver, respectively. By suppressing interference between individual LED lights using deconvolution methods, the system achieved 5.76 kbps using 60 fps global-shutter camera.

2. A high-speed VLC system using OFDM modulated lights from a single LED and a rolling shutter camera was proposed and implemented. The system achieved the communication speed of 24 kbps with less than 10 % errors using a 60 fps camera having 524 line sensors on its imager.

3. Selective Communication such as a TV or a radio was confirmed to be possible by changing a shutter speed of a camera that selectively receives and decodes a different carrier of OFDM modulated signals from an LED illumination.

研究分野：可視光通信

キーワード：高速可視光通信 選択的通信

## 1. 研究開始当初の背景

申請者らはこれまでに、音響信号による高精度 3 次元測位の研究を進めてきた[1]。目標とする測位性能の実現には信号伝搬時間の正確な計測が必要であり、そのためには時刻同期技術が大きな影響を与える。一方、複数ノードを瞬時に数十マイクロ秒以下の精度で時刻同期させるのは非常にチャレンジングな課題である。申請者らは LED 照明からの変調光をスマートフォンのカメラで撮像することで、標準偏差 20  $\mu$  秒未満の高精度遅延時間推定技術を構築した[2]。この技術を用いて、1 cm 未満の精度でスマートフォンの 3 次元音響測位できることを示した[3] (申請者らの知る限り可聴領域音響信号利用で世界最高レベルの測位性能)。そこで本研究では、独自の遅延時間推定技術を拡張、発展させることで携帯端末向け的高速可視光通信を実現することとした。

## 2. 研究の目的

近年の照明技術とスマートフォンやタブレット PC 等汎用カメラ搭載端末の普及ならびに高機能化により、高サンプリングレートの光センサによる従来手法に加えて、低サンプリングレートの汎用カメラを受信機とする可視光通信技術が注目を集めている。この技術は IoT (Internet of Things)、拡張現実、デジタルサイネージへの展開など、社会へのインパクトや実用面での期待も大きい。汎用カメラを用いる可視光通信の主たる課題として、電波に比べて圧倒的に低い転送速度、人が感じる光源のちらつき(フリッカ)が挙げられる。ローリングシャッター機能を利用し撮像素子の行単位での on-off keying を行う場合、短時間露光による受信信号の SN 比悪化が問題となる。本研究では上記の問題への解決策を提案し、よりセキュアで選択的な通信技術を確立する。その通信性能ゆえ電波の利用が制限される状況などに限られていた可視光通信を、照明とカメラ付き携帯端末という普遍的なデバイスにより、広範な利用が期待できる通信技術とするためのブレークスルーを目指す。

本研究では、照明器具と汎用カメラによる実用的な高速可視光通信手法について研究する。従来手法では、面光源からの変調光をローリングシャッター機能付きカメラで撮影することで高速化を実現していた。提案手法では、光源の種類(点、面あるいは線光源)やシャッターの種類(ローリングシャッターあるいはグローバルシャッター)の制約を設けない。1 光源当たりフレームレートの数倍のビットレートを実現し、さらに点光源の特性を生かした空間分割多重化により、数 M bps の通信を達成する。人間がちらつきを感じる変調光は、照明に適さない。よって、高周波数の変調光によるフリッカレス光源を用い、特定の端末を対象としたよりセキュアな選択的通信と携帯端末向け的高速可視光通信を実現する。

## 3. 研究の方法

### LED アレイを用いた空間多重分割による高速可視光通信

#### A) LED アレイの開発

使用したマイコンは Atmel 社の Atmega328P である。LED アレイは Opto Supply 社の緑色ドットマトリクス L 8 x 8 ドット OSL641501-AG を使用し、AVR 書き込み機は Atmel 社の JTAGICE3 を使用した、開発環境は AtmelStudio にて C 言語で実装し、ループ処理部分をインラインアセンブラで記述することでクロック数の調整を行った。ループ処理部分に必要な時間を AVR 内蔵の 16bit タイマーカウントを用いて制御する場合、8 クロックでタイマーが 1 カウントされる。これを考慮し、1 ループ処理を 8 の倍数になる様に、インラインアセンブラで調整した結果、1 ループは最短 32 クロック (内部タイマー 4 カウント) で調整が可能であった。これを元に基板上的 DIP スイッチで 1 ループのクロック数を調整できるように作成した。USB パラレル変換モジュールは FTDI 社の IC FT245RL を使用し、作成した転送用のデータを Cygwin を用いて PC から基盤に転送することで先に述べた制御を実現する。Atmega328P のクロック周波数は 20MHz まで上げることが可能であるが、汎用動画カメラのフレーム周期である 1/30 (s) や 1/60 (s) の倍数の周期の信号を作成しやすくするためにクロック周波数は 19.660800MHz に設定した。図 1 に LED アレイを示す。

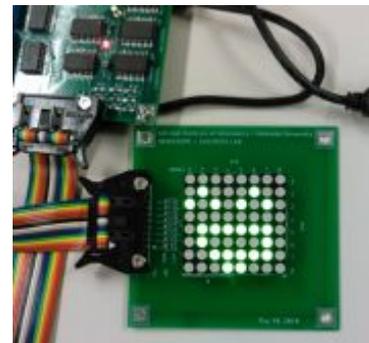


図 1 8x8 LED アレイ

#### B) 逆畳み込みによる通信性能改善

カメラの焦点が合っていない場合、カメラで撮影された画像はぼやけており、復号化される受信信号は劣化する状態が起きる。その結果、隣り合う光源間での輝度値の干渉なども起き、復号が困難になる。この問題に対処するために、本研究ではウィナーフィルタを用いた逆畳み

込みに基づく画像復元手法を画像データに適用することを提案する。LED アレイの各 LED 光源を広がり関数 (Point Spread Function: PSF) としてモデル化した。

### C) 実験結果

焦点距離を変数とし、直交振幅変調 (Quadrature Amplitude Modulation: QAM) で変調された送信信号に対する提案手法の効果を実験で検証した。図 2, 3 に結果を示す。通信エラーが低減され提案手法が有効に機能していることが確認できた。

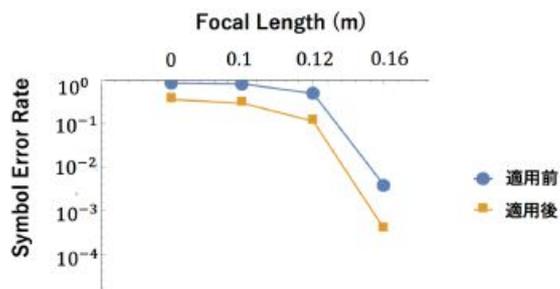


図 2 16-QAM での実験結果

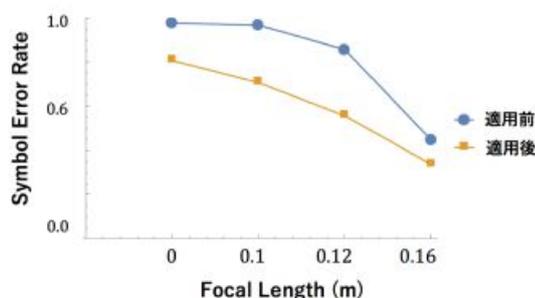


図 3 64-QAM での実験結果

## 単光源 OFDM 変調光による高速可視光通信

### A) 概要

提案手法では信号を周波数領域で扱い、多重化することで高速通信の実現する。具体的には、まずサブキャリアとして QAM を用いサブキャリアの位相と振幅に情報を載せる。高速化のために、直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) により多数のキャリアを光源から送信する。受信機であるカメラの各ピクセルは 1 フレームの時間内で光の変化を積分し、1 つの値を出力する。その値を基に送信データが復号される。符号化、復号の詳細は文献[4]に記載している。

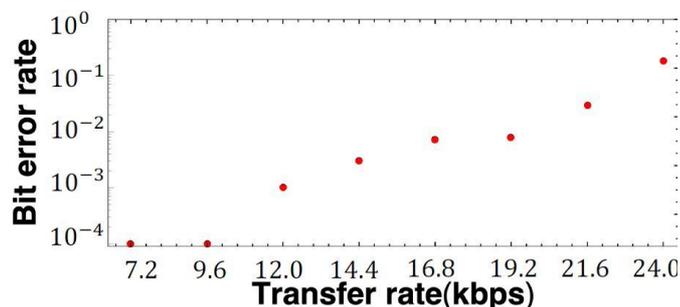


図 4 転送速度とビット誤り率

### B) 評価実験

60 fps ラインセンサ数 524 本の汎用動画カメラを用いた実験結果を図 4 に示す。9.6 kbps まではビットエラー率 0 で通信が可能であること、24 kbps 以下では 10% 以下であることが確認された。

## 選択的可視光通信

### A) 概要

OFDM 変調された送信信号をカメラで受光する。各キャリアの周波数はカメラ周期  $T_c$  (フレームレートの逆数) の整数倍であり、それぞれ 1 次 ( $1/T_c$ )、2 次 ( $2/T_c$ )、... と呼ぶ。このとき、カメラはフィルタとして機能し、露光時間の値によるキャリア選択性を示すことが理論的に証明できる (詳細は [5] を参照)。図 5 は各シャッター開度に対する各キャリア信号の信号強度を示す。

### B) 評価実験

LED 単光源から 50 次、75 次、78 次および 80 次のキャリア波を送信し、それを 60 fps の汎用カメラを受信した。カメラのシャッター開度 (露光時間比) は、それぞれ 0.9872、0.50、0.20、0.6799 に設定した。送信信号は 4PSK、8PSK、16PSK で符号化され、異なる距離に設置されたカメラ側で復号されるビット誤り率を基に、選択的可視光通信の性能評価を行った。図 6 に示す通り、各露光時間比に対し、特定次数のキャリアのみが低い誤り率で受信され、それ以外のキャリアについては誤り率が高くなっていることが確認できる。

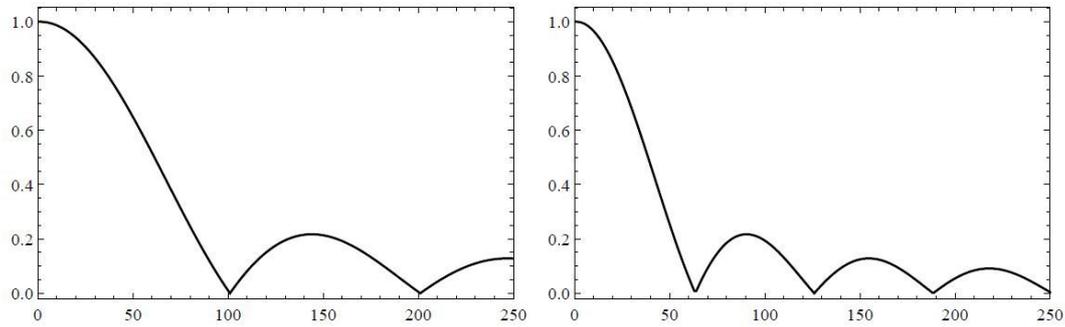


図5 送信信号に対する受信信号の強度比(縦軸)とキャリア次数との関係。左図はシャッター開度5%、右図はシャッター開度8%

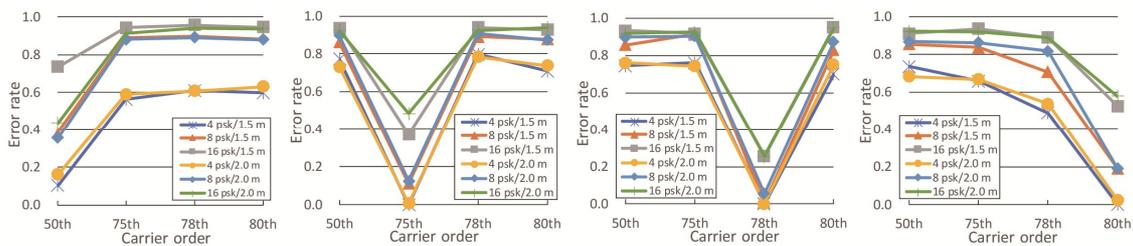


図6 各シャッター開度(露光時間比)での各キャリアに対する通信誤り率

#### 4. 研究成果

本研究の主な研究成果は以下の通りまとめられる。

1. 空間分割多重変調による高速通信：複数の点光源を含む LED array 送信機と多数の撮像素子からなる単一のカメラを受信機として用い、各送受信素子間での空間分割多重化による可視光通信を実現した。各光源の信号が干渉しカメラの各受光素子で重畳して受信される状況で逆畳み込み(deconvolution)等によりそれらを分離、抽出し受信信号の SN 比を理論限界まで近づける技術を確認した。MPU 制御による 8x8LED アレイ照明の設計を用いた実験では、60fps の汎用グローバルシャッターカメラで 5.76 kbps の通信性能を実現した。
2. OFDM による高速可視光通信：OFDM (直交周波数分割多重化)変調光と汎用ローリングシャッターカメラを用いた単一 LED 光源による高速可視光通信を提案、実装した。評価実験の結果、60 fps、ラインセンサ数 524 本のカメラを用い、24 kbps 以下で誤差 10% 以下の通信性能を実現した。さらに、送受信系の数理解析モデルに基づき、実験結果と理論との整合性を検証した。
3. 選択的可視光通信：カメラが光源に対するフィルタとして機能することを数理的にモデル化することで、カメラパラメータの変更による選択的可視光通信が可能であることを理論的に示した。さらに、複数キャリアからなる OFDM 変調光に対し、シャッター開度を変えることで受光可能なキャリアが変わること、それにより TV やラジオのような情報通信が可視光通信でも可能であることを実証した。

#### <引用文献>

1. 中村, 秋山, 杉本, 橋爪: 音響信号を用いたスマートフォンの高速・高精度屋内 3 次元位置認識手法, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.11, pp. 2489 - 2500 (2016) .
2. Sugimoto, M., Kumaki, H., Akiyama, T., Hashizume, H.: Optimally Modulated Illumination for Rapid and Accurate Time Synchronization, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol.65, No.2, pp.505-516 (2017).
3. Akiyama, T., Sugimoto, M., Hashizume, H. :Time-of-arrival-based Indoor Smartphone Localization Using Light-synchronized Acoustic Waves, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E100-A, No.9, pp.2001-2012 (2017).
4. 嶋田, 橋爪, 杉本: CMOS イメージセンサを用いた OFDM 高速可視光通信, 電子情報通信学会論文誌 B 2019 年 (印刷中) .
5. 橋爪, 杉本: 汎用ビデオカメラを用いた可視光通信, 電子情報通信学会誌, Vol.101, No.1, pp. 44-51 (2018).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

1. 嶋田, 橋爪, 杉本: CMOS イメージセンサを用いた OFDM 高速可視光通信, 電子情報通信学会論文誌 B 2019 年 (印刷中, 査読あり) .
2. 杉本, 熊木, 秋山, 橋爪: TOPVLC: 時間遅延推定のための最適変調信号を用いることによる高速可視光通信手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J101-B, No.5, pp.405-416 (2018, 査読あり).
3. 橋爪, 杉本: 汎用ビデオカメラを用いた可視光通信, 電子情報通信学会誌, Vol.101, No.1, pp. 44-51 (2018, 解説記事, 査読なし).

〔学会発表〕(計 11 件)

1. Uno, K., Hirano, A., Hashizume, H., Sugimoto, M.: Illegal Photograph Detection under Modulated LED Illumination, In Proceedings of PerCom 2019, Kyoto, Japan, 2019
2. Hirano, A., Shimada, S., Hashizume, H., Sugimoto, M.: Selective Visible Light Communication for Multiple Video Cameras using a Single Light Source, In Proceedings of ACM SenSys 2018, Shenzhen, China, pp. 335-336, 2018.
3. Shimada, S., Hashizume, H., Sugimoto, M.: Indoor Positioning Using Reflected Light and a Video Camera, In Proceedings of IPIN 2018, Nantes, France, pp. 1-8, 2018.
4. Alfarozi, S., Amaya S., Hashizume, H., Woraratpanya, K. Sugimoto, M.: Robust and Unified System for Visible Light Communication with CMOS Camera Using Neural Decoding, In Proceedings of ISIP2018, Fukuoka, Japan (2018).
5. Sugimoto, M., Kumaki, H., Akiyama, T., Hashizume, H.: High-speed Optical Camera Communication using an Optimally Modulated Signal, In Proceedings of IEEE ICASSP 2018, Calgary, Canada (2018) available at <http://sigport.org/3099>.
6. 雨夜, 嶋田, 橋爪, 杉本: 汎用動画カメラを用いた空間分割多重化による高速可視光通信, 情報処理北海道シンポジウム 2018, 北見, 北海道, 2018 年 10 月 .
7. 宇野, 平野, 橋爪, 杉本: 変調光 LED 照明下における違法撮影画像の検出手法の提案, 情報処理北海道シンポジウム 2018, 北見, 北海道, 2018 年 10 月
8. 平野, 嶋田, 橋爪, 杉本: 単一光源を用いた複数動画カメラへの選択的可視光通信, 第 58 回情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究会, 東京, 2018 年 5 月 .
9. Shimada, S. Akiyama, T., Hashizume, H., Sugimoto, M.: OFDM Visible Light Communication using Off-the-shelf Video Camera, In Proceedings of ACM SenSys 2017, Delft, The Netherlands (2017).
10. 嶋田, 秋山, 橋爪, 杉本: 汎用動画カメラを用いた OFDM 可視光通信, 電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会 (ASN), 北海道大学, 札幌 (2017 年 7 月) .
11. 雨夜, 嶋田, 秋山, 橋爪, 杉本: 空間分割多重化による汎用動画カメラを用いた高速可視光通信, 知的環境とセンサネットワーク研究会 (ASN), 北海道大学, 札幌 (2017 年 7 月) .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究分担者氏名: 橋爪 宏達

ローマ字氏名: HASHIZUME, Hironichi

所属研究機関名: 国立情報学研究所

部局名: アーキテクチャ科学研究系

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 40172853

については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。